

Е. Д. ЗАЙДЕНБЕРГ

(Ижевск)

О ВЫБОРЕ ЧИСЛА МЕСТ ПОДКЛЮЧЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

На производительность системы автоматического контроля (САК) существенно влияют затраты времени на подключение контролируемого изделия к системе и отключение его по окончании контроля. Если при ручном контроле это время составляет небольшой процент в общем балансе затрат времени на контроль, то в САК по мере сокращения основного времени проверки удельный вес времени подключения — отключения возрастает и в некоторых САК, например в пультах автоматической проверки монтажа кабельных изделий, достигает 50—70%.

Влияние времени подключения — отключения на производительность САК можно уменьшить их многоместным исполнением. Однако при этом растет стоимость САК и снижается их надежность. Эти два противоречивых момента обуславливают постановку задачи оптимального выбора числа мест подключения изделий в САК. Настоящая работа посвящена исследованию этой задачи.

Оптимизация числа мест подключения производится по общему экономическому критерию, характеризующему эффективность САК. Таким критерием в данном случае является снижение стоимости контроля одного изделия при замене одноместного исполнения многоместным (N -местным):

$$\Delta C_{N} = C_{\text{пр}} (t_{\text{по } 1} - t_{\text{по } N}) - E \frac{C_{\text{к}}}{A} - C_{\text{в.к}} - C_{\text{д.к}} - C_{\text{н}}, \quad (1)$$

где $C_{\text{пр}}$ — стоимость работы оператора в единицу времени; $t_{\text{по } 1}$, $t_{\text{по } N}$ — времена подключения — отключения изделия при одно- и N -местном исполнении САК соответственно; E — нормативный коэффициент сравнительной эффективности капитальных затрат (принимается равным 0,15); $C_{\text{к}}$ — стоимость коммутатора мест подключения; A — годовая программа изделий, контролируемых САК; $C_{\text{в.к}}$ — средние приведенные затраты на восстановление коммутатора при его случайных отказах; $C_{\text{д.к}}$ — дополнительные приведенные затраты на контроль САК, связанные с увеличением числа рабочих мест; $C_{\text{н}}$ — средние дополнительные приведенные затраты, связанные со скрытыми отказами коммутатора.

Для выбора оптимального числа мест подключения необходимо определить функциональные зависимости отдельных составляющих вы-

ражения (1) от числа мест подключения, причем следует учитывать, что эти зависимости могут быть различными для разных моделей процесса эксплуатации САК. Ниже приводится решение поставленной задачи для следующей модели процесса эксплуатации системы. Один раз в сутки производится контроль САК с целью выявления всех скрытых отказов, причем предполагается, что аппаратура контроля САК абсолютно надежна, т. е. обнаруживает все скрытые отказы системы и всегда признает систему годной, если скрытого отказа нет. Контроль производится по каждому месту подключения. Учитывая, что при контроле должны имитироваться и годность, и брак, принимаем, что время, необходимое на контроль по одному месту подключения, равно удвоенному времени проверки изделия с помощью САК:

$$t_k = 2(t_{np} + t_{no1}), \quad (2)$$

где t_{np} — машинное время проверки изделия.

Если при контроле выявлен скрытый отказ системы, то вся суточная продукция после восстановления САК подвергается перепроверке.

Ремонт САК производится немедленно после возникновения явного отказа или после выявления скрытого отказа при очередном контроле. Решение производится при следующих допущениях: 1) потоки явных и скрытых отказов коммутатора являются простейшими и характеризуются средними частотами явных (λ_r) и скрытых ($\lambda_{с.г}$) отказов одной переключающей группы контактов и средней частотой явных отказов реле в целом (λ_p); 2) пропускная способность САК обеспечивает годовой выпуск A изделий с учетом потерь времени на ремонт и перепроверки.

Рассмотрим наиболее часто встречающийся случай, когда все время подключения — отключения расходуется на ручные манипуляции оператора по присоединению и отсоединению изделий. Очевидно, что в этом случае речь может идти только о двухместной САК, так как дальнейшее увеличение числа мест подключения не имеет смысла. Здесь возможны два варианта: $t_{no1} > t_{np}$ и $t_{no1} \leq t_{np}$. В первом варианте время проверки полностью совмещено со временем подключения — отключения, за исключением особенностей в начале и конце проверки партии, возникающих в тех случаях, когда либо время подключения t_n , либо время отключения t_o , либо каждое из них меньше времени проверки. Во втором варианте, напротив, время подключения — отключения совмещено со временем проверки, кроме времени подключения первого и отключения последнего изделия в партии.

В соответствии с изложенным время t_{noN} выражается следующим образом:

а) при $t_{no1} > t_{np}$, причем $t_n \geq t_{np}$, а $t_o < t_{np}$,

$$t_{no2} = t_{no1} - t_{np} + \frac{t_{np} - t_o}{v}, \quad (3a)$$

где v — средний размер партии изделий;

б) при $t_{no1} > t_{np}$, причем $t_n < t_{np}$, а $t_o \geq t_{np}$,

$$t_{no2} = t_{no1} - t_{np} + \frac{t_{np} - t_n}{v}; \quad (3б)$$

в) при $t_{no1} > t_{np}$, причем $t_n < t_{np}$ и $t_o < t_{np}$,

$$t_{no2} = t_{no1} - t_{np} + \frac{2t_{np} - t_{no1}}{v}; \quad (3в)$$

г) при $t_{\text{по } 1} > t_{\text{пр}}$, причем $t_{\text{п}} > t_{\text{пр}}$ и $t_0 > t_{\text{пр}}$,

$$t_{\text{по } 2} = t_{\text{по } 1} - t_{\text{пр}}; \quad (3г)$$

д) при $t_{\text{по } 1} \leq t_{\text{пр}}$

$$t_{\text{по } 2} = \frac{t_{\text{по } 1}}{\nu}. \quad (3д)$$

Стоимость коммутатора на два места подключения определяется количеством коммутируемых цепей изделия М. При выполнении на реле условия

$$C_{\text{к } 2} = C_{\text{р}} \left[\frac{M}{r} \right] + C_{\text{м}} M, \quad (4)$$

где $C_{\text{р}}$ — стоимость одного реле, имеющего r групп; $C_{\text{м}}$ — стоимость монтажа одной переключающей группы; квадратные скобки означают ближайшее сверху целое число.

Дополнительные затраты на контроль САК по второму рабочему месту составляют

$$C_{\text{д.к } 2} = 2 C_{\text{пр}} \frac{l}{A} (t_{\text{пр}} + t_{\text{по } 1}), \quad (5)$$

где l — число рабочих суток в году (при 5-дневной рабочей неделе $l=253$). Дополнительные затраты, связанные со скрытыми отказами коммутатора, определяются увеличением числа проверяемых изделий из-за перепроверки суточной продукции при выявлении скрытого отказа:

$$C_{\text{п } 2} = C_{\text{пр}} (t_{\text{пог}} + t_{\text{пр}}) (e^{24 M \lambda_{\text{с.г}}} - 1). \quad (6)$$

Средние приведенные затраты на восстановление коммутатора при его случайных отказах складываются из затрат на устранение явных и скрытых отказов. Поскольку первые встречаются $\lambda (t_{\text{по } 2} + t_{\text{пр}})$ раз на одно изделие, а вторые $\frac{l}{A} (1 - e^{-24 M \lambda_{\text{с.г}}})$ раз, то

$$C_{\text{в.к}} = C_{\text{в}} T_{\text{в}} \left\{ \lambda (t_{\text{по } 2} + t_{\text{пр}}) + \frac{l}{A} (1 - e^{-24 M \lambda_{\text{с.г}}}) \right\}, \quad (7)$$

где $C_{\text{в}}$ — стоимость работ по восстановлению в единицу времени; $T_{\text{в}}$ — среднее время устранения одного отказа. Значение λ может быть определено как

$$\lambda = \lambda_{\text{г}} M + \lambda_{\text{р}} \left[\frac{M}{r} \right]. \quad (8)$$

Подставляя (3)–(7) в (1), предъявляя требование $\Delta C_{\text{н}} > 0$ и выражая из полученного неравенства $t_{\text{по } 1}$, получим условие, при котором целесообразно двухместное исполнение САК: для $t_{\text{по } 1} > t_{\text{пр}}$

$$t_{\text{по } 1} \leq \frac{C_{\text{пр}} t_{\text{пр}} \left\{ \frac{\nu - b_1}{\nu} - \frac{b_1 C_{\text{в}} T_{\text{в}}}{C_{\text{пр}} \nu} \left(\lambda_{\text{г}} M + \lambda_{\text{р}} \left[\frac{M}{r} \right] \right) - \frac{b_1}{\nu} (e^{24 M \lambda_{\text{с.г}}} - 1) - \right.}{C_{\text{в}} T_{\text{в}} \left(\lambda_{\text{г}} M + \lambda_{\text{р}} \left[\frac{M}{r} \right] \right) \frac{\nu - b_3}{\nu} + 2 C_{\text{пр}} \frac{l}{A} +} - \frac{2l}{A} + C_{\text{пр}} b_2 \left\{ \frac{1}{\nu} + \frac{C_{\text{в}} T_{\text{в}}}{C_{\text{пр}} \nu} \left(\lambda_{\text{г}} M + \lambda_{\text{р}} \left[\frac{M}{r} \right] \right) + \frac{1}{\nu} (e^{24 M \lambda_{\text{с.г}}} - 1) \right\} -}{+ C_{\text{пр}} (e^{24 M \lambda_{\text{с.г}}} - 1) \frac{\nu - b_3}{\nu} -}$$

$$\rightarrow \frac{-\frac{E}{A} \left(C_p \left[\frac{M}{r} \right] + C_M M \right) - C_B T_B \frac{l}{A} (1 - e^{-24 M \lambda_{c.r}})}{-C_{np} \frac{b_3}{v}}, \quad (9)$$

где b_1 , b_2 и b_3 определяются по таблице;

$$t_{no1} \geq \frac{C_{np} t_{np} \left\{ \frac{C_B T_B}{C_p} \left(\lambda_r M + \lambda_p \left[\frac{M}{r} \right] \right) + (e^{24 M \lambda_{c.r}} - 1) + \frac{2l}{A} + \right.}{C_{np} \frac{v-1}{v} - C_B \frac{T_B}{v} \left(\lambda_r M + \lambda_p \left[\frac{M}{r} \right] \right) -} \rightarrow$$

$$\frac{+\frac{E}{A} \left(C_p \left[\frac{M}{r} \right] + C_M M \right) + C_B T_B \frac{l}{A} (1 - e^{-24 M \lambda_{c.r}})}{-2 C_{np} \frac{l}{A} - \frac{C_{np}}{v} (e^{24 M \lambda_{c.r}} - 1)}. \quad (10)$$

(Заметим, что формула (10) справедлива лишь при положительном знаменателе.)

Например, если подставить в (9) и (10) следующие значения:

Коэффициенты	$t_{no} > t_{np}$	$t_{no} < t_{np}$	$t_{no} < t_{np}$	$t_{no} > t_{np}$
	а)	б)	в)	г)
b_1	1	1	2	0
b_2	t_o	t_{no}	0	0
b_3	0	0	1	0

$t_{np} = 0,02$ ч, $A = 20\,000$ шт.,
 $v = 100$ шт., $C_{np} = 0,57$ руб/ч,
 $M = 20$, $r = 4$ группы, $C_p =$
 $= 3,6$ руб., $C_M = 0,18$ руб., $l =$
 $= 253$ дн., $E = 0,15$, $\lambda_r =$
 $= 5 \cdot 10^{-5}$, $\lambda_p = 2 \cdot 10^{-5}$, $\lambda_{c.r} =$
 $= 5 \cdot 10^{-6}$, $C_B = 1$ руб/ч, $T_B =$
 $= 1$ ч, то получим, что двух-
местное исполнение САК
выгодно при $3,4 \text{ сек} \leq$
 $\leq t_{no1} \leq 2320 \text{ сек}$.

Перейдем к рассмотре-
нию более сложной структуры времени t_{no1} , характеризующейся тем,
что, во-первых, $t_{no1} > t_{np}$, во-вторых, время t_{no1} состоит из двух ком-
понент: ручного времени $t_{no}^{(1)}$ и времени входа контролируемого изделия
в режим t_{np} (например, времени подогрева при контроле электронных
ламп, времени входа в режим радиоэлектронных систем после подачи
питания и т. п.). Из двух возможных вариантов — $t_{no} > t_{np}$ и $t_{no} \leq t_{np}$ —
первый приводит к рассмотренным выше случаям, второй — к возник-
новению целесообразности исполнения САК с числом мест подклюече-
ния $N > 2$.

Очевидно, что максимальное число мест подключения определяет-
ся формулой

$$N_{\max} = \left[\frac{t_{no1}}{t_{np}} \right] + 1, \quad (11)$$

где квадратные скобки, как и ранее, означают ближайшее сверху целое
число; при этом время $t_{no N_{\max}}$ определяется формулой (3д). Зна-
чение $t_{no N}$ для любого $N < N_{\max}$ может быть легко найдено из рас-
смотрения циклограммы работы САК при N -местном исполнении:

$$t_{no N} = \frac{t_{no1}}{v} + \{t_{no1} - (N - 1) t_{np}\} \frac{v - N}{v N}. \quad (12)$$

Стоимость коммутатора является функцией числа мест подклюече-
ния N и числа коммутируемых цепей изделия M . Если коммутатор вы-

полнен на реле в виде M -вершинной пирамиды, то в нем используется $M(N-1)$ переключающих групп, объединенных в реле. В этом случае

$$C_{к N} = C_p G + C_m M (N - 1). \quad (13)$$

Число реле в коммутаторе G определяется следующей формулой, полученной методом математической индукции:

$$G = \sum_{i=1}^{2^{\lfloor \log_2 N \rfloor}} b_i \left[\frac{i M}{r} \right], \quad (14)$$

где

$$b_{i \text{ при } i = 2^n} = \begin{cases} 0 & \text{при } N < 2i \\ 2 & \text{при } N = 2^{\lfloor \log_2 N \rfloor} + i \\ 1 & \text{при остальных } N \end{cases};$$

$$b_{i \text{ при } i \neq 2^n} = \begin{cases} 1 & \text{при } N = 2^{\lfloor \log_2 N \rfloor} + i \\ 0 & \text{при остальных } N \end{cases}.$$

n — целое положительное число (включая 0); квадратные скобки означают ближайшее сверху целое число, прямые скобки — целую часть числа.

Средние приведенные затраты на восстановление коммутатора при его случайных отказах выразятся формулой

$$C_{в.к} = C_v T_v \left\{ (\lambda_r M N - \lambda_r M + \lambda_p G) (t_{по N} + t_{пр}) + \frac{l}{A} - \frac{l}{A} e^{-24 M (N-1) \lambda_{с.г}} \right\}. \quad (15)$$

Дополнительные затраты на контроль САК по всем рабочим местам составляют

$$C_{д.к N} = 2 (N - 1) C_{пр} \frac{l}{A} (t_{пр} + t_{по 1}), \quad (16)$$

а дополнительные затраты, связанные со скрытыми отказами коммутатора,—

$$C_{и N} = C_{пр} (t_{по N} + t_{пр}) \{ e^{24 M (N-1) \lambda_{с.г}} - 1 \}. \quad (17)$$

Подставляя (12), (13), (15)—(17) в (1), получим

$$\Delta C_N \text{ при } N \leq N_{\max} = C_{пр} \left\{ t_{по 2} \frac{N-1}{N} + t_{пр} \frac{(N-1)(\nu-N)}{\nu N} \right\} - \frac{E}{A} \{ C_p G + C_m M (N-1) \} - C_v T_v \{ \lambda_r M (N-1) + \lambda_p G \} \times \\ \times \left(\frac{t_{по 1}}{N} + t_{пр} \frac{N^2 - N + \nu}{\nu N} \right) - 2 C_{пр} (M-1) \frac{l}{A} (t_{пр} + t_{по 1}) - \\ - C_v T_v \frac{l}{A} \{ 1 - e^{-24 M (N-1) \lambda_{с.г}} \} - C_{пр} \left(t_{по 1} \frac{1}{N} + \right. \\ \left. + t_{пр} \frac{N^2 - N + \nu}{\nu N} \right) \{ e^{24 M (N-1) \lambda_{с.г}} - 1 \}. \quad (18)$$

Задача заключается в том, чтобы найти N , при котором выигрыш ΔC_N становится максимальным. Анализ показывает, что обычные

методы поиска экстремума в данном случае непродуктивны, так как переход к конечным разностям (производная неприменима из-за целочисленности аргумента) не упрощает исходного выражения. Поэтому наиболее рационально вычисление (18) для ряда N и выбор из них максимального значения ΔC_N .

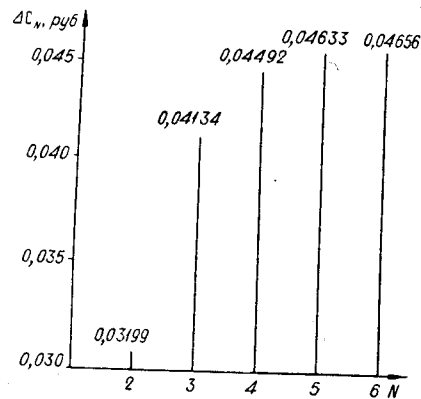


Рис. 1.

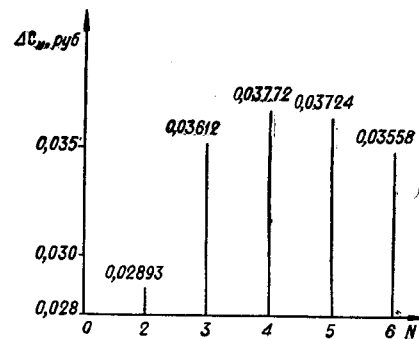


Рис. 2.

На рис. 1 приведена зависимость ΔC_N от N для рассмотренного выше примера с добавлением условия $t_{по1} = 0,1$ ч. В данном случае $N_{\max} = \left[\frac{0,10}{0,02} \right] + 1 = 6$ и выигрыш ΔC_N получается максимальным при $N = N_{\max}$. На рис. 2 приведена аналогичная зависимость для $M=200$ (в рассмотренном примере $M=20$); максимум ΔC_N достигается при $N=4$.

Выводы

При однородной структуре времени подключения изделия к САК и отключения его от САК, характеризующейся тем, что все это время расходуется на ручные манипуляции, двухместное исполнение САК рационально при соизмеримых значениях времени подключения — отключения и времени проверки и нецелесообразно при слишком малых и слишком больших по сравнению со временем проверки временах подключения — отключения. Численные границы целесообразности двухместного исполнения САК по $t_{по}$ заданы рабочими формулами.

При неоднородной структуре $t_{по}$ может оказаться целесообразным N -местное исполнение САК. Рациональное значение N должно обеспечивать максимум полученного в работе выражения для снижения стоимости контроля ΔC_N .

Поступила в редакцию
29 ноября 1967 г.,
окончательный вариант
29 мая 1968 г.